

	UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA GESTIÓN DE BIBLIOTECAS				   	
	CARTA DE AUTORIZACIÓN					
CÓDIGO	AP-BIB-FO-06	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA 1 de 1

Neiva, ____20 de enero del 2023__

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

El (Los) suscrito(s):

Rubiel Andres Torres Tovar, con C.C. No. 1. 082.780.984__, Autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado

titulado **EFFECTO DE LAS FUGAS EN LA UNIFORMIDAD DE EMISIÓN EN LATERALES DE RIEGO POR GOTEO**

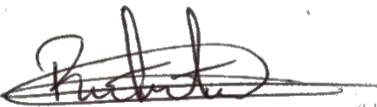
Presentado y aprobado en el año ____2022____ como requisito para optar al título de INGENIERO AGRÍCOLA;

Autorizo (amos) al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que, con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales “open access” y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.
- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.
- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que, de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores”, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma: 

Rubiel Andres Torres Tovar

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.

	UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS					   	
	DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	1 de 3

TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO: EFECTO DE LAS FUGAS EN LA UNIFORMIDAD DE EMISIÓN EN LATERALES DE RIEGO POR GOTEO

AUTOR O AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Torres Tovar	Rubiel Andres

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Bedoya Cardoso	Marlio

ASESOR (ES):

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Ardila Marín	Juan Gonzalo
Palmeth Martínez	Luis Humberto

PARA OPTAR AL TÍTULO DE: INGENIERO AGRÍCOLA

FACULTAD: FACULTAD DE INGENIERIA

PROGRAMA O POSGRADO: INGENIERÍA AGRÍCOLA

CIUDAD: NEIVA **AÑO DE PRESENTACIÓN:** 2022 **NÚMERO DE PÁGINAS:** 37

TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):

Diagramas__X_ Fotografías_X_ Grabaciones en discos__ Ilustraciones en general__ Grabados__ Láminas__ Litografías__ Mapas__ Música impresa__ Planos__ Retratos__ Sin ilustraciones__ Tablas o Cuadros_X_

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.

	UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	2 de 3

SOFTWARE requerido y/o especializado para la lectura del documento: WORD DE MICROSOFT

MATERIAL ANEXO: N/A

PREMIO O DISTINCIÓN (*En caso de ser LAUREADAS o Meritoria*): N/A

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

<u>Español</u>	<u>Inglés</u>	<u>Español</u>	<u>Inglés</u>
1. __Fuga__	__Drain__	6. __Pendiente Topográfica__	__
2. __Tubería Lateral__	__Side Pipe__	7. _____	_____
3. __Riego por Goteo__	__Drip Irrigation__	8. _____	_____
4. __Uniformidad de Emisión__	__Emission Uniformity__	9. _____	_____
5. __Presión__	__Pressure__	10. _____	_____

RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)

El coeficiente de uniformidad de emisión es una expresión de la estadística matemática que caracteriza la uniformidad de emisión, la eficiencia y la precisión con el que se está aplicando el agua en un determinado lugar de un sistema de riego a presión. El coeficiente de uniformidad varía teniendo en cuenta factores tales como el método de riego, sistema de filtración, emisor, variación de presión, entre otros; por lo tanto, el presente estudio tiene como objetivo establecer el efecto que causa una fuga sobre la uniformidad de emisión y en la variación de presión a lo largo de un lateral de riego por goteo de 50 metros de longitud y 13 milímetros de diámetro interior, en el cual se insertaron emisores Xeri-Bug 10PC (XB-10). Este lateral fue evaluado con pendiente cero (0) y pendiente ascendente y descendente de 2%. La metodología que se utilizó para dar respuesta al objetivo planteado fue la siguiente: 1) se aforó cuatro veces cada emisor del lateral de riego en un tiempo de 1 minuto; 2) para asegurar la presión a la entrada del lateral, esta se revisaba y corregía cada vez que se aforaban 15 goteros y 3) Se midió la caída de presión al 20%, 40%, 60%, 80% y 100%, de la longitud del lateral. Finalmente, se simulaban fugas a lo largo del lateral y se repitieron los tres pasos de la metodología. Los resultados indicaron que entre más cerca esté la fuga de la entrada del lateral, ocurre una disminución del 10% del coeficiente de uniformidad y del 5% en la presión del sistema.

	UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS						
	DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	3 de 3

ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

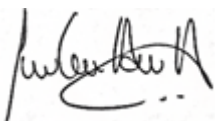
The emission uniformity coefficient is an expression of the mathematical statistics that characterizes the emission uniformity, the efficiency, and the precision with which the water is being applied in a determined place of a pressurized irrigation system. The uniformity coefficient varies taking into account factors such as the irrigation method, filtration system, emitter, pressure variation, among others; therefore, the present study aims to establish the effect caused by a leak on the emission uniformity and on the pressure variation along a drip irrigation lateral 50 meters long and 13 millimeters in internal diameter, into which Xeri-Bug 10PC (XB-10) emitters were inserted. This lateral was evaluated with a zero slope (0) and an ascending and descending slope of 2%. The methodology that was used to respond to the proposed objective was the following: 1) each emitter of the irrigation lateral was measured four times in a time of 1 minute; 2) to ensure the pressure at the entrance of the lateral, it was checked and corrected every time 15 drippers were measured and 3) the pressure drop was measured at 20%, 40%, 60%, 80% and 100%, of the length of the side. Finally, leaks along the lateral were simulated and the three steps of the methodology were repeated. The results indicated that the closer the leak is to the lateral inlet, there is a 10% decrease in the coefficient of uniformity and a 5% decrease in system pressure.

APROBACIÓN DE LA TESIS

Nombre presidente Jurado:

Firma:

Nombre Jurado: Juan Gonzalo Ardila Marín

Firma: 

Nombre Jurado: Luis Humberto Palmeth Martínez

Firma:



Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.

EFFECTO DE LAS FUGAS EN LA UNIFORMIDAD DE EMISIÓN EN LATERALES DE RIEGO POR GOTEO

Trabajo de grado presentado al departamento de Ingeniería Agrícola
como requisito para optar al título de: Ingeniero Agrícola

Autor

Rubiel Andres Torres Tovar: 20152141690

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Agrícola

Neiva, Huila, Colombia. 2022

Director: DSc. Marlio Bedoya Cardoso

Nota de aceptación

Aprobado

Jurado: MSc. Juan Gonzalo Ardila Marín

Jurado: PhD. Luis Humberto Martínez
Palmeth



RESUMEN

El coeficiente de uniformidad de emisión es una expresión de la estadística matemática que caracteriza la uniformidad de emisión, la eficiencia y la precisión con el que se está aplicando el agua en un determinado lugar de un sistema de riego a presión. El coeficiente de uniformidad varía teniendo en cuenta factores tales como el método de riego, sistema de filtración, emisor, variación de presión, entre otros; por lo tanto, el presente estudio tiene como objetivo establecer el efecto que causa una fuga sobre la uniformidad de emisión y en la variación de presión a lo largo de un lateral de riego por goteo de 50 metros de longitud y 13 milímetros de diámetro interior, en el cual se insertaron emisores Xeri-Bug 10PC (XB-10). Este lateral fue evaluado con pendiente cero (0) y pendiente ascendente y descendente de 2%. La metodología que se utilizó para dar respuesta al objetivo planteado fue la siguiente: 1) se aforó cuatro veces cada emisor del lateral de riego en un tiempo de 1 minuto; 2) para asegurar la presión a la entrada del lateral, esta se revisaba y corregía cada vez que se aforaban 15 goteros y 3) Se midió la caída de presión al 20%, 40%, 60%, 80% y 100%, de la longitud del lateral. Finalmente, se simulaban fugas a lo largo del lateral y se repitieron los tres pasos de la metodología. Los resultados indicaron que entre más cerca esté la fuga de la entrada del lateral, ocurre una disminución del 10% del coeficiente de uniformidad y del 5% en la presión del sistema.

Palabras clave: Fuga, Tubería lateral, Riego por goteo, Uniformidad de emisión. Presión. Pendiente topográfica.



1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de riego presurizados de alta frecuencia han demostrado tener una excelente uniformidad de aplicación del recurso hídrico en la producción agrícola; de ahí la importancia de evaluar y estimar la uniformidad de emisión. En ese sentido, Zhang y Merkley (2012) mencionan que, la uniformidad de aplicación de agua se puede cuantificar con la determinación del Coeficiente de Uniformidad de Emisión *EU*; a su vez, Barragán *et al.*, (2005), define el *EU* como un término de uniformidad estadístico que puede ser utilizado para establecer la presión del sistema. El coeficiente de uniformidad de emisión es un parámetro importante para el diseño y evaluación de sistemas de riego presurizado (Pizarro, 1996). Por ello, cabe resaltar como primera medida que con el fin de lograr y mantener una óptima uniformidad es importante un buen “*diseño, mantenimiento y manejo*” de los sistemas de riego (Wang *et al.*, 2020), y segundo, el flujo del conjunto de emisores de un lateral de riego se ve directamente afectado por la variación de presión dentro de la tubería (Barragán *et al.* 2005), lo que ocasiona que se afecte la uniformidad de aplicación del agua, produciendo así una variación directa en el *EU*

El diseño de una tubería lateral crítica de riego por goteo debe tener en cuenta las variables necesarias para minimizar el efecto de la variación de presión generada por las pérdidas por fricción y pérdidas localizadas, así como el desnivel topográfico del terreno y de esta forma, no se afecte la uniformidad de emisión del agua. Baimonte (2018) ratifica que, durante el proceso de diseño se debe limitar la variación de presión a un aproximado de la presión nominal en toda la longitud de la tubería lateral, en ese sentido, Yurdem *et al.*, (2015) afirma que, para el diseño de la longitud óptima de un lateral de riego, se debe tener variaciones de presión y caudal en un rango apropiado.

Los trabajos de investigación relacionados con la variación de presión y la uniformidad de emisión en los sistemas de riego localizado se han centrado en el tipo de emisor, espaciamientos entre ellos y pérdidas localizadas. No obstante, poco se ha estudiado el efecto que tienen las fugas generadas por labores culturales sobre la variación de la *EU* y la presión en los laterales de riego por goteo.

Basado en lo anterior, se propone establecer cuál es el efecto que tiene una fuga sobre la uniformidad de emisión y la variación de la presión a lo largo de la longitud del lateral con tres condiciones de pendiente topográfica.

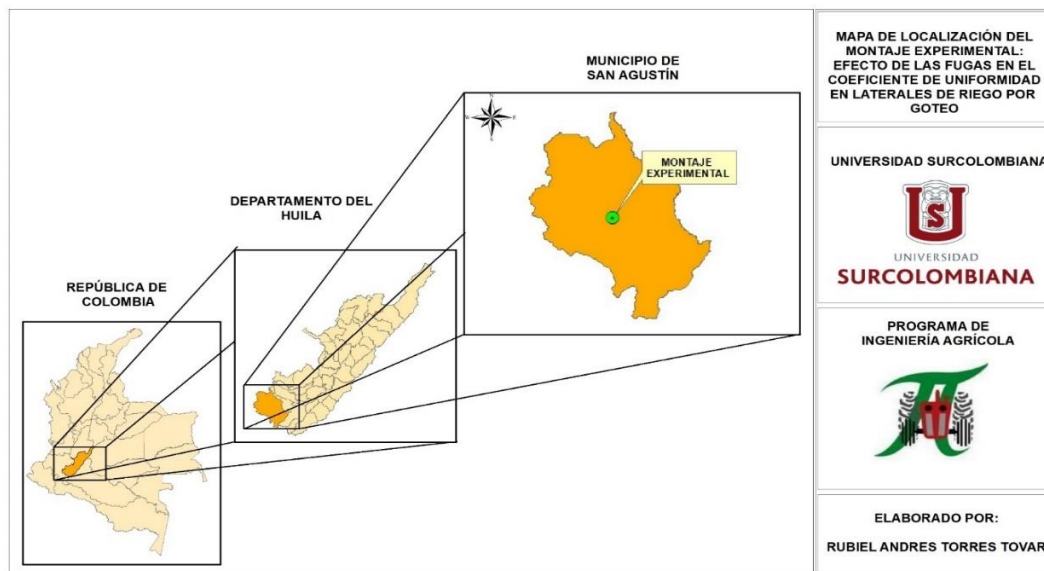


2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Ubicación de la zona de estudio

El trabajo de investigación se desarrolló en la zona rural del municipio de San Agustín, al sur del departamento del Huila, específicamente a 28 km del casco urbano en la finca denominada Los lagos de la vereda Puerto Quinchana, con localización geográfica $1^{\circ} 55' 16.45''$ Norte y $-76^{\circ} 25' 34.22''$ Oeste y extensión de 2,3 ha. (Figura 1).

Figura 1. Ubicación del montaje experimental de las pruebas del lateral de riego.



Fuente: Elaboración Propia.

2.2. Levantamiento altimétrico.

El levantamiento altimétrico se realizó con el nivel marca *TOPCON* modelo *AT-B4* con su trípode metálico para nivelación, y su respectiva mira topográfica de 5 metros. Para ello, se midieron 50 metros de longitud y se instalaron 25 puntos de referencia cada 2 metros (Figura 2). Así mismo, se utilizó la aplicación *Mobile Topographer* con nivel de precisión de ± 4 m para obtener la altura sobre el nivel del mar, por lo que las cotas obtenidas se utilizaron como cotas relativas.

Figura 2. Levantamiento topográfico altimétrico.

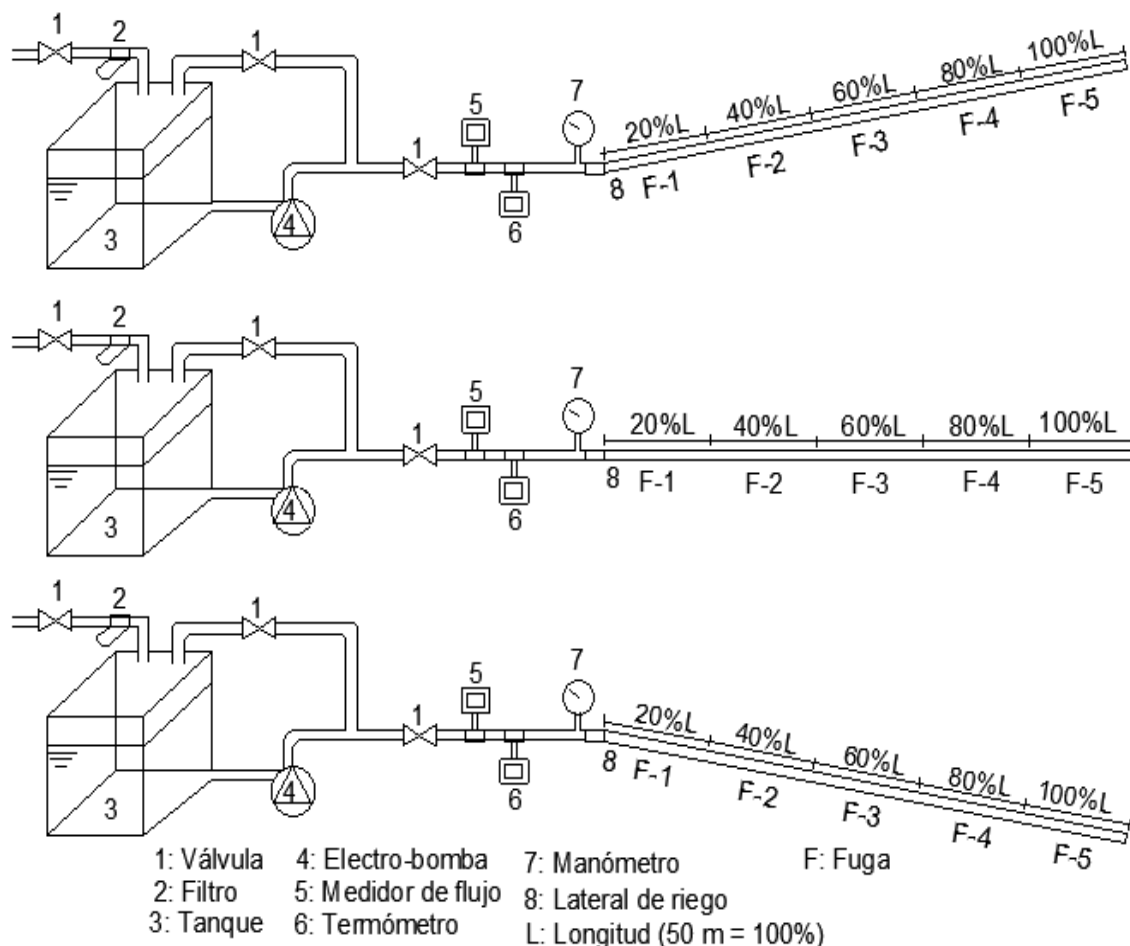


Una vez finalizado el levantamiento topográfico altimétrico, se procedió a realizar el tratamiento de los datos en una hoja de cálculo con el fin de obtener las cotas relativas de cada punto de referencia y el respectivo perfil topográfico del sitio donde se estableció el montaje de estudio.

2.3.Experimental

Se utilizó un lateral de 50 metros de longitud con diámetro interior de 13.6 mm, en el cual se etiquetaron e insertaron 83 goteros espaciados a 0.6 metros; este lateral se evaluó con pendiente uniforme (cero) y pendiente ascendente y descendente de 2%. El aforo volumétrico de cada emisor se realizó con cuatro repeticiones empleando una probeta graduada y un cronómetro, así mismo, la presión a la entrada del lateral fue verificada cada vez que se aforaban 15 emisores. El montaje se aprecia en la Figura 3.

Figura 3. Disposición del montaje experimental del lateral con y sin fugas.



Fuente: Elaboración Propia.

Para evaluar correctamente el lateral de riego por goteo en condiciones normales (sin fugas) y con una fuga parcial se dividió la longitud del lateral en 5 partes iguales (cada 10 metros),

la fuga se simuló quitando un emisor para poder establecer el comportamiento de la uniformidad de emisión y la variación de presión a lo largo de este lateral. Este procedimiento se realizó con tres condiciones de pendiente. En la Tabla 1 se muestra el número del emisor que fue extraído del lateral.

Tabla 1. Localización de fugas en el lateral de riego.

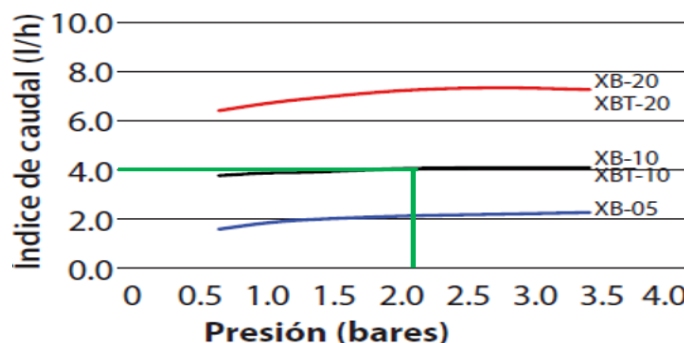
Porcentaje de la tubería	Longitud (m)	Número de Emisor
20%	10	16
40%	20	33
60%	30	50
80%	40	67
100%	50	83

Fuente: Elaboración Propia.

2.4. Elección de los Emisores y Tubería.

Se seleccionó el modelo de emisor Xeri-Bug 10PC (XB-10) de color negro de la marca *Rain Bird*, con caudal promedio de 3.79 l/h. Esta clase de emisor posee un rango de presión de operación que inicia en 1.02 kg/cm^2 hasta 3.57 kg/cm^2 . De igual manera, su presión media es de aproximadamente 2 kg/cm^2 (Figura 4).

Figura 4. Grafica del emisor Xeri-Bug 10PC.



Fuente: Adaptado del catálogo de Rain Bird, 2018.

2.5. Selección de espaciamiento entre emisores

La selección del espaciamiento entre los emisores de estudio se realizó basados en la tabla proporcionada por Keller y Karmeli, (1974) quien sugiere que los espaciamientos efectivos de los emisores estén basados en el área humedecida como un porcentaje del área total irrigada en función de la textura del suelo y la descarga del emisor. Debido a que el caudal promedio del emisor de estudio es de aproximadamente 4 l/h y la textura del suelo determinada mediante la metodología organoléptica como gruesa, se obtuvo que el espaciamiento entre los emisores fue de 0.6 m (Tabla 2).

Tabla 2. Separación de los emisores en el lateral.

Separación Efectiva entre Laterales		Menos de 1,5 lph (0.4 gph)			2 lph (0.5 gph)			4 lph (1 gph)			8 lph (2 gph)			Mayor de 12 lph (3 gph)		
		Espaciamiento Recomendado entre Goteros a lo largo la lateral para textura de Suelo: Gruesa (G), Media (M) y Fina (F).														
		G	M	F	G	M	F	G	M	F	G	M	F	G	M	F
		0.2	0.5	0.9	0.3	0.7	1.0	0.6	1	1.3	1	1.3	1.7	1.3	1.6	2.0
		0.7	1.7	3.0	1	2.3	3.3	2	3.3	4.3	3.3	4.3	5.6	4.3	5.3	6.6
m	Ft	Porcentaje de Suelo Humedecido														
0,8	2,6	38	88	100	50	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
1,0	3,3	33	70	100	40	80	100	80	100	100	100	100	100	100	100	
1,2	3,9	25	58	92	33	67	100	67	100	100	100	100	100	100	100	
1,5	4,9	20	47	73	26	53	80	53	80	100	80	100	100	100	100	
2,0	6,6	15	35	55	20	40	60	40	60	80	60	80	100	80	100	
2,5	8,2	12	28	44	16	32	48	32	48	64	48	64	80	64	80	
3,0	9,8	10	23	37	13	26	40	26	40	53	40	53	67	53	67	
3,5	11,5	9	20	31	11	23	34	23	34	46	34	46	57	46	57	
4,0	13,1	8	18	28	10	20	30	20	30	40	30	40	50	40	50	
4,5	14,8	7	16	24	9	18	26	18	26	36	26	36	44	36	44	
5,0	16,4	6	14	22	8	16	24	16	24	32	24	32	40	32	40	
6,0	19,7	5	12	18	7	14	20	14	20	27	20	27	34	27	34	

Fuente: Modificada de Trickle irrigation desing parameters (Keller y Karmeli. 1974).

2.6. Diseño de la tubería lateral de riego presurizado por goteo

Como las pérdidas de carga en una tubería están en función de velocidad y del régimen del flujo, se utilizó la ecuación de la continuidad y se despejó en función de la velocidad para determinar dicha magnitud (Ecuación 1) posteriormente, se empleó la ecuación adimensional del Reynolds (Ecuación 2), con el fin de establecer el régimen hidráulico de un fluido, es decir, si determinado flujo se encuentra en estado laminar, en transición o en estado turbulento.

$$V = \frac{Q}{A} \quad (1)$$

$$Re = \frac{DV}{\gamma} \quad (2)$$

Donde: V es la Velocidad en (m/s), Q es el Caudal del fluido que trasiega a través de la tubería en m³/s y A corresponde al Área de dicha tubería en m², D que es el diámetro de la tubería en (m), V es la Velocidad del fluido en (m/s) y γ que corresponde a la viscosidad cinemática del flujo en (m²/s)



Para determinar el factor de fricción se utilizó la Ecuación 3 y 4 propuestas por Blasius y Bagarello respectivamente.

$$f = \frac{0.3164}{Re^{0.25}} \quad (3)$$

$$f = \frac{C}{Re^m} \quad (4)$$

$$C = \frac{6.152}{Re^{0.183}} \quad (5)$$

$$m = \frac{2}{8 - \left(\frac{12.40}{Re^{0.157}}\right)} \quad (6)$$

Donde: f es el factor de fricción formulado por Blasius y Bagarello, Re corresponde al Número de Reynolds, finalmente, C y m son coeficientes desarrollados por Bagarello.

Para comparar qué ecuación describe mejor el comportamiento de las pérdidas por fricción H_f se emplearon las ecuaciones de Hazen – Williams y Darcy-Weisbach. La expresión desarrollada por Hazen – Williams se describe a continuación (Ecuación 7).

$$H_f = 10.643 \frac{Q^{1.85}}{C^{1.85} D^{4.871}} S \quad (7)$$

Donde: Q es el caudal de circulación (m^3/s), C es el coeficiente de pérdidas desarrollado por Hazen – Williams y D corresponde al diámetro interior de la conducción del fluido.

La ecuación propuesta por Darcy-Weisbach (Ecuación 8), se combinó algebraicamente para determinar las pérdidas por fricción con temperatura del agua de 18 °C, dando origen a la Ecuación 9.

$$H_f = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (8)$$

$$H_f = 7.89 \times 10^{-4} \frac{LQ^{1.75}}{D^{4.75}} \quad (9)$$

Donde: f es el factor de fricción, L corresponde a la longitud de la tubería y g corresponde a la gravedad en (m/s^2), asimismo, 7.89×10^{-4} es un coeficiente que depende tanto de la viscosidad como de la densidad del fluido.

Se utilizó la ecuación propuesta por Darcy-Weisbach en función del caudal (Ecuación 10) y el factor de fricción f planteado por Bagarello (Ecuación. 4) con el fin de determinar las



pérdidas que se generan por el rozamiento del agua con la tubería, y comparar los resultados con los arrojados por la Ecuación 9.

$$Hf = 0.082626 f \frac{LQ^2}{D^5} \quad (10)$$

Las pérdidas menores generadas por las características del emisor de estudio se determinaron con el uso de la expresión planteada por Bagarello *et al.* (1997) (Ecuación 11) que depende tanto del área de la tubería como del área ocupada por el emisor dentro de dicha tubería.

$$Kx = 1.68 \left(\frac{Ap}{Ag} - 1 \right)^{1.29} \quad (11)$$

Donde: Kx corresponde al coeficiente de pérdidas locales desarrollado por Bagarello *et al.* 1997. Ap es el área de la sección circular de la tubería (m^2) y Ag área ocupada por el emisor dentro de la tubería (m^2)

La determinación de las pérdidas menores se llevó cabo con el fin de analizar la variación de pérdida de carga a lo largo de la tubería lateral de riego con presencia y ausencia de fugas, la cual depende del caudal circulante en la tubería, su diámetro y de las características geométricas del emisor (Ecuación 12).

$$hm = 0.082626 Kx \frac{Q^2}{D^4} \quad (12)$$

Donde: hm son las pérdidas menores, Kx corresponde al coeficiente de pérdidas locales desarrollado por Bagarello *et al.* 1997.

La pendiente hidráulica o pérdidas por carga unitaria J es la combinación algebraica de las ecuaciones de Darcy Weisbach, Blasius y Reynolds, con temperatura del agua igual a 18 °C (Ecuación 13)

$$J = 7.89 \times 10^{-4} \frac{Q^{1.75}}{D^{4.75}} \quad (13)$$

Dónde: J es la pérdida de carga unitaria en $m/100 m$

De igual modo, para determinar las pérdidas por carga unitaria corregida por conexión J^* de goteros sobre línea, se empleó la Ecuación 14, y para determinar la longitud equivalente Fe , se empleó la ecuación propuesta por Keller y Bliesner (1990). (Ecuación 15)

$$J^* = J \frac{S_e + F_e}{S_e} \quad (14)$$

$$Fe = 0.2883 \left(\frac{Ap}{Ag} \right)^2 - 0.0795 \left(\frac{Ap}{Ag} \right) - 0.2255 \quad (15)$$



Dónde: f^* es la pérdida de carga unitaria corregidas en $m/100 m$; Se es la separación entre emisores en m ; Fe es la longitud equivalente.

Para emplear la Ecuación 15 se determinó el área de la sección circular de la tubería, se utilizó un calibrador Pie de Rey digital marca *Ubermann* con precisión $\pm 0.2 mm / 0.01''$ y el área que ocupa el emisor dentro de la tubería, se estableció mediante el uso del software de diseño de dibujo asistido por computador *AutoCAD* 2019.

En la determinación de las pérdidas por fricción en el lateral de riego o tubería con salidas múltiples (Ecuación 17) se utilizó la Ecuación 14 que establece las pérdidas de carga unitaria corregidas y la Ecuación 16 denominada factor de salidas múltiples F propuesto por Christiansen, (1942), así como, la longitud de la tubería. Finalmente, la presión a la entrada del lateral fue determinada empleando la Ecuación 18.

$$F = \frac{1}{m+1} + \frac{1}{2N} + \frac{\sqrt{m-1}}{6N^2} \quad (16)$$

$$hf = J^* FL \quad (17)$$

$$HL = \bar{h} + \frac{3}{4} hf \pm \left(\frac{1}{2}\right) \frac{SL}{100} \quad (18)$$

Dónde: HL = Presión a la entrada del lateral (m); h = Presión media el emisor (m); hf = Pérdidas por fricción (m); S = Pendiente topográfica del terreno (%); m = Exponente de la velocidad o caudal en la fórmula usada para el cálculo de las pérdidas por fricción = 1.75; N = Número de salidas a lo largo de la tubería, en este trabajo fueron 83.

2.7. Instalación del montaje de estudio

2.7.1. Instalación del Cabezal de Control

En primer lugar, se instaló el filtro de mallas marca *Irritec* previo a la llegada de agua al tanque con el fin de evitar obstrucción en los emisores por sedimentos. Luego, con el objetivo de proporcionar la presión necesaria en la entrada del lateral se instaló una electrobomba de 1 HP de la marca Barnes modelo *QB80*, inmediatamente después de la bomba se instaló una válvula de globo de $\frac{1}{2}$ pulgada para regular el flujo de agua hacia el lateral y de manera directa controlar la presión. Posteriormente, se instaló un sensor de flujo de la marca Sea modelo *YF S201* y un sensor de temperatura de la marca Dalla modelo *DS18B20*, así como también; se colocó un display *LCD* marca *LD* modelo *1602^a+12C* con el propósito de medir el caudal y temperatura del agua que ingresa en la tubería, finalmente, se instaló un manómetro de glicerina de la marca *GPI* a la entrada del lateral (Figura 5).

Figura 5. Disposición de la instalación experimental (Cabezal de control).



1: Filtro, 2: Tanque, 3: Electrobomba, 4: Válvula, 5: Sensor de flujo, 6: Sensor de temperatura, 7: Display LCD, 8: Manómetro

2.7.2. Instalación del Montaje del lateral de riego

La evaluación del lateral de riego por goteo se llevó a cabo con pendiente cero (0) y pendiente ascendente y descendente de 2%. Para ello, la altura de la instalación de la tubería en las tres posiciones de estudio se determinó basado en el levantamiento topográfico. Se emplearon 25 listones de madera espaciadas a 2 m y una tablilla de madera de 0.07 m de ancho y 50 metros de largo para asegurar la tubería lateral, después, se instaló dicha tablilla en cada posición topográfica seleccionada con el lateral y los goteros previamente insertados con ayuda de un obturador a una distancia de 0.6 m. (Figura 6, 7 y 8).

Figura 6. Disposición experimental del lateral de riego a nivel.



Figura 7. Disposición experimental del lateral de riego con pendiente ascendente.



Figura 8. Disposición experimental del lateral de riego con pendiente descendente.



Con el montaje propuesto, se determinó la uniformidad de emisión en un lateral de riego de 50 metros con las tres condiciones de pendiente topográfica. Por otra parte, se pretendió detallar las características de la fuga, analizar la variación y la distribución de la carga de altura a lo largo del lateral del estudio.

2.8. Medición de la uniformidad de emisión del lateral del riego sin fugas

Una vez instalado el lateral de riego por goteo en la pendiente a evaluar se aseguró que el nivel de agua en el tanque permaneciera constante para evitar su variación y succión de aire. Posteriormente se encendió la bomba y el medidor de flujo durante cinco minutos hasta estabilizar la presión a la entrada del lateral con la ayuda de una válvula metálica de cortina. Luego se procedió de la siguiente manera: 1) en el primer 20% de la longitud del lateral, se realizó el aforo volumétrico a cada emisor con cuatro repeticiones, utilizando una probeta graduada de 100 ml durante 1 minuto (Figura 9). 2) luego se verifica la presión a la entrada del lateral. 3) se repiten los pasos 1 y 2 hasta llegar al 100%L. El procedimiento descrito anteriormente se realizó con pendiente cero (0) y pendiente ascendente y descendente de 2%.

Figura 9. Aforo de los emisores del lateral de riego en condiciones normales.



2.9. Medición de la presión en el lateral de riego sin fugas

Luego de realizar el aforo de los emisores para establecer la uniformidad de emisión, se llevó a cabo la medición de presión en los goteros de la Tabla 1. Se verificó la presión a la entrada del lateral, luego, se extrajo el emisor, se insertó el manómetro de glicerina marca *GPI* durante un minuto y se registró dicha presión. Este mismo procedimiento se realizó en los puntos donde estaban los emisores 16, 33, 50, 67 y 83 con las pendientes seleccionadas (Figura 10).

Figura 10. Medición de la presión dentro de la tubería lateral.



2.10. Medición de la uniformidad de emisión del lateral de riego con fugas parciales

Una vez realizado el aforo volumétrico de todos los emisores del lateral de riego y verificada la presión a la entrada del lateral se simuló la primera fuga del lateral, extrayendo el primer emisor ubicado al 20%L de la tubería, se esperó 1 minuto y luego se registró el nuevo valor de la presión a la entrada del lateral. Posteriormente, se realizaron los 3 pasos descritos en el inciso 2.8. Es importante mencionar que la fuga fue aforada durante 1 minuto con 5

repeticiones al inicio de la prueba y al final de esta. Cuando se terminó de aforar la fuga, se insertó el emisor número 16 y se verificó la presión a la entrada del lateral (Figura 11). El procedimiento descrito anteriormente se hizo con los emisores seleccionados de la Tabla 1 y con las tres pendientes seleccionadas en este trabajo.

Figura 11. Aforo de los emisores del lateral de riego con fuga.



2.11. Ecuaciones para establecer el coeficiente de uniformidad

Se emplearon tres (3) expresiones que determinan el coeficiente de uniformidad del lateral de riego con pendiente cero (0), pendiente ascendente y descendente de 2% así como la simulación de fugas parciales.

En la determinación del coeficiente de uniformidad de emisión se tiene en cuenta diferentes variables, entre las que se encuentran el Caudal promedio $\bar{q}$ del emisor del lateral de riego (Ecuación 19) y la desviación estándar σ (Ecuación 20).

$$\bar{q} = \frac{\sum_i^N X_i}{N} \quad (19)$$

$$\sigma = \sqrt{\sum_i^N \frac{(X_i - \bar{X})^2}{N}} \quad (20)$$

Donde: X_i corresponde a la observación número i de la variable X que corresponde al caudal medido en cada emisor (l/h), N es el número de observaciones y $\bar{X}$ es el valor promedio del agua recogida (l/h). Basado en la determinación de las ecuaciones 19 y 20 se establece el coeficiente de variación del emisor de estudio (Ecuación 21).

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{q}} \quad (21)$$

Donde: σ es la desviación estándar en (l/h) y $\bar{q}$ corresponde al caudal promedio del emisor (l/h)



Para determinar el caudal del lateral (Ecuación 22) se llevó a cabo la sumatoria del caudal de cada uno de los emisores del lateral en estudio. Donde: QL es caudal del lateral (l/min) y la sucesión de números de 1 hasta 83 corresponden a los emisores del lateral.

$$QL = \sum_{i=1}^{83} i = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + \dots + x_{83} \quad (22)$$

Barragán *et al* (2005), establece la Ecuación 23 con el fin de determinar la Uniformidad de Emisión (EU) en sistemas de riego presurizados por goteo, el cual está en función del coeficiente 1.27 que corresponde al cuartil inferior de la distribución normal de los caudales del lateral, del coeficiente de variación Cv del emisor, del número de emisores que se encuentran ubicados en la misma planta (ep), del menor caudal de los goteros aforados $qmind$ en l/h y del caudal medio de dimensionamiento $qmedd$ en l/h

$$EU = 1 - \sqrt{\left(1 - \frac{qmind}{qmedd}\right)^2 + \left(\frac{1,27Cv}{\sqrt{ep}}\right)^2} \quad (23)$$

De igual manera, Keller y Karmeli (1975), plantearon una expresión que establece la Uniformidad de emisión en riego por goteo comúnmente utilizada en el dimensionamiento de tubería con salidas múltiples en sistemas de riego presurizados de alta frecuencia.

$$EU = 100 \left[1 - \frac{1,27Cv}{\sqrt{ep}} \right] \frac{qmind}{qmedd} \quad (24)$$

Donde: 1.27 es el coeficiente que corresponde al cuartil inferior de la distribución normal de los caudales del lateral de estudio, CV es el coeficiente de variación, ep se refiere a el número de emisores que se encuentran situados en la misma planta, $qmind$ es el caudal más bajo de todos los emisores (l/h) y $qmedd$ hace referencia al caudal medio de dimensionamiento en l/h .

Del mismo modo, Keller y Karmeli (1974) formularon la Ecuación 25, la cual establece el coeficiente de uniformidad de emisión a partir de pruebas de campo, por lo que es conocida como “Ecuación de campo”. Expresión que sirve para el diseño y manejo de laterales de sistemas de riego por goteo.

$$EU = 100 \frac{q_{25\%h}}{qmedd} \quad (25)$$

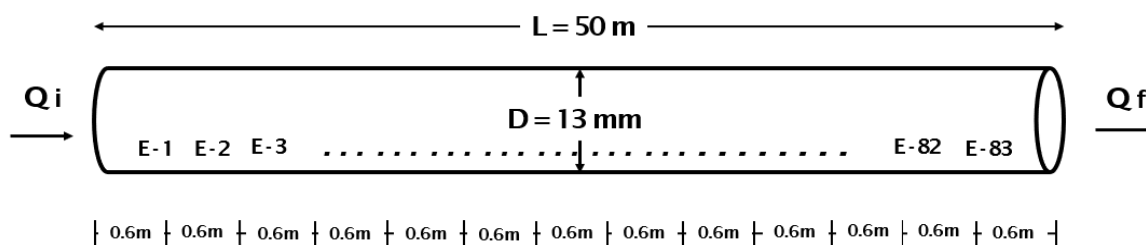
Donde: $q_{25\%h}$ corresponde al cuartil menor de la muestra l/h

Evaluación de pérdidas de carga total en el lateral de riego por goteo en condiciones normales y con fugas parciales

2.11.1. Evaluación de pérdidas de carga del lateral en condiciones normales

En el proceso de diseño de la tubería lateral se estimaron las pérdidas por fricción H_f con tubería de salidas múltiples mediante el producto entre las pérdidas de carga unitaria corregidas por las pérdidas de conexión del emisor J^* y el Factor de Christiansen F . Sin embargo, para determinar las pérdidas de carga total de la tubería lateral en condiciones de cero pendiente, se cuantifican las pérdidas de carga causadas por fricción y las pérdidas localizadas h_m tramo por tramo a partir del último emisor del lateral de riego (Figura 12).

Figura 12. Diagrama del lateral de riego por goteo.



Fuente: Elaboración Propia

Lo descrito anteriormente se llevó a cabo utilizando la medición del caudal medio de los goteros obtenidos para la determinación del coeficiente de uniformidad en condiciones normales, teniendo en cuenta la longitud de la tubería, el diámetro interno, material de construcción, la temperatura del agua, así como, la sección geométrica de la parte del gotero que se encuentra dentro de la tubería. Los factores de fricción (f) empleados fueron los propuestos por Blasius y Bagarello debido a que dichos factores se pueden emplear en el rango del número de Reynolds en el cual trabajan los laterales de riego.

El análisis de las pérdidas por fricción tramo a tramo se realizó desde el final (emisor 83) hasta el emisor número 1, ubicado al inicio del lateral. Posteriormente, se determinó la velocidad del agua en cada segmento teniendo en cuenta el área de la tubería y caudal trasegado, luego, se calculó el Número de Reynolds y el factor de fricción (f), finalmente, se determinaron las pérdidas de presión generadas por fricción en cada tramo.

Las pérdidas localizadas (pérdidas menores) tramo por tramo se determinaron empleando la ecuación propuesta por Bagarello *et al* (1997), de esta forma, la pérdida de carga total del tramo fue la sumatoria de las pérdidas por fricción y la pérdida localizada producidas por el emisor insertado.

2.11.2. Determinación de la presión en los puntos de estudio a partir de las pérdidas de carga total

El procedimiento que se llevó a cabo para determinar la pérdida de carga total del lateral de riego con presencia de fugas fue el citado en el numeral 2.12.1. en las tres pendientes



topográficas seleccionadas, adicionalmente se tuvo en cuenta el caudal de la fuga. Para el caso del presente estudio dicha metodología se denominó: *Determinación de la carga de altura a través de la estimación de pérdidas de carga total tramo a tramo* y se utilizó para establecer la presión en los puntos de estudio mediante la diferencia de la presión medida en el lateral con las pérdidas generadas hasta la sección donde se desea establecer la carga de altura. Para el presente trabajo dicha diferencia de cargas se denominará presión teórica HT

Las pérdidas localizadas hm se realizaron como está establecido en el numeral 2.12.1. de manera que la evaluación de dichas pérdidas se realizó tramo por tramo antes y después de la fuga, sumando los gastos de los emisores y el generado en la fuga. Posteriormente, se sumaron H_f y H_m de todos los tramos analizados. En el caso del lateral con pendiente ascendente, se añadió el valor de la diferencia topografía (2%) a la sumatoria de las pérdidas de carga total, contrario a lo que sucedió cuando el lateral se encontraba con una pendiente descendente en donde se sustrajo el valor de la diferencia topográfica; este procedimiento se realizó simulando fugas al 20%, 40%, 60%, 80% y 100% de la tubería.

2.11.3. Ecuaciones para determinar la carga de altura en el sitio de fuga del lateral

La presión en el punto de cada simulación de fuga en el lateral de riego por goteo con las tres condiciones de pendiente se determinó teniendo en cuenta las pérdidas menores debido a la despresurización de la tubería H_M , que se determinó con la Ecuación 26, el diámetro del orificio de la fuga y el caudal que trasiega por dicho orificio determinado como se mencionó en el numeral 2.10 donde se establece que el caudal de la fuga se determina a partir de la medición del volumen de agua y su flujo se fracciona con el tiempo de medición. En el mismo sentido, a partir de las mencionadas variables se estableció la velocidad del flujo con la Ecuación 1, su carga de velocidad H_v con la Ecuación 27 y el coeficiente de pérdidas K_c con la Ecuación 28. Finalmente, se utilizó la Ecuación 29 con el fin de establecer de manera teórica el valor de la presión en la entrada del lateral después de la fuga HL_T

$$H_M = H_1 - H_2 \quad (26)$$

$$H_v = \frac{v^2}{2 * g} \quad (27)$$

$$K_c = \frac{H_M}{C_c} \quad (28)$$

$$HL_T = H_1 - K_c \frac{v^2}{2 * g} \quad (29)$$

Donde: A corresponde al área del orificio de la fuga (m^2), H_M es el valor de las pérdidas menores (kg/cm) el cual se determina con la diferencia entre el valor de la presión real en la entrada del lateral antes de la fuga H_1 y el valor real de la presión después de la fuga H_2 . H_v es la carga de velocidad, también conocida como carga cinética, K_c corresponde al



coeficiente de pérdidas el cual es adimensional y HL_T es el valor teórico de la presión a la entrada del lateral de riego con presencia de fuga. Las anteriores ecuaciones se utilizaron en cada simulación de fuga con las diferentes condiciones de pendiente debido a la variación del caudal de la fuga.

2.11.4. Determinación de la presión en el sitio de la fuga a partir de las pérdidas de carga total

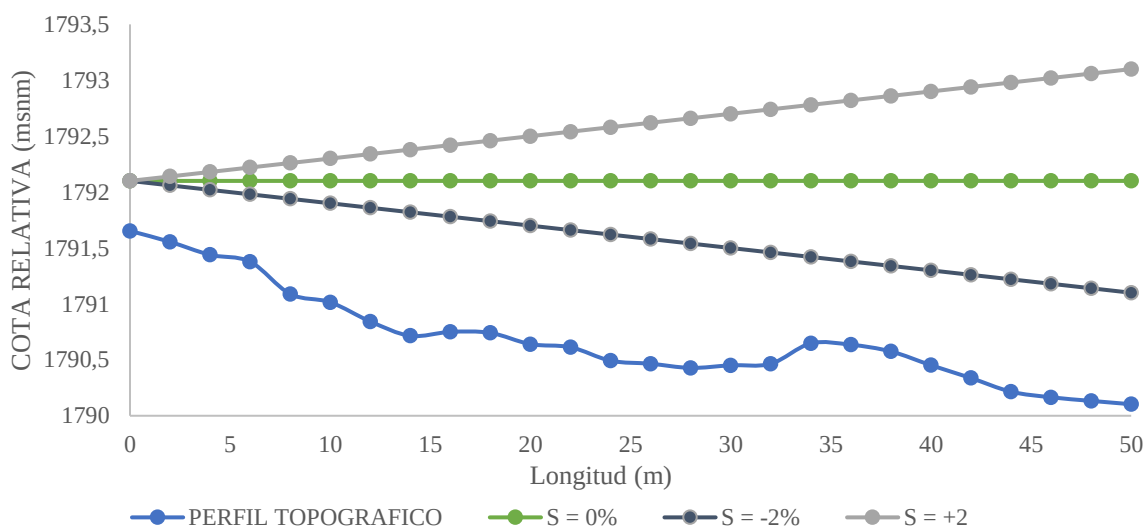
La determinación de la carga de presión en el sitio de la fuga se llevó a cabo estableciendo las pérdidas de carga total en el lateral con y sin fugas, este procedimiento se realizó a través de cuatro pasos diferentes: primero, se llevó a cabo la medición de la cabeza de presión en los puntos establecidos del estudio antes de la fuga; segundo, se midió la carga de presión luego de generar la fuga; tercero, se estableció las pérdidas de carga tramo a tramo mediante una hoja de cálculos de *Excel* del programa de *Microsoft 365* y por último, a partir de las pérdidas estimadas en el tercer paso se determinó la carga de altura en puntos del estudio y mediante el uso de la Ecuación 29 se estableció el valor de la presión en la entrada del lateral y finalmente determinar la carga de altura en el orificio de la fuga.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Levantamiento Topográfico Altimétrico

Con el levantamiento topográfico se obtuvo el perfil longitudinal del terreno en 50 m donde se dispuso el montaje del lateral, en ese sentido, se estableció la distancia que se ascendió desde el suelo hasta determinada altura con el fin de configurar las tres pendientes de trabajo establecidas en el estudio. (Figura 13).

Figura 13. Posición topográfica del lateral de riego por goteo.



3.2. Diseño de la tubería lateral de riego presurizado por goteo

3.2.1. Área de la sección circular de la tubería lateral

Se utilizó un calibrador Pie de Rey digital marca STAINLESS cuyos resultados fueron que el diámetro promedio interno fue de 0.0131 m, por lo tanto, el área de la sección circular fue 1.347 cm^2

3.2.2. Área ocupada por el emisor dentro de la tubería

El área ocupada por el emisor dentro de la tubería lateral fue de 0.0001 m^2 , se obtuvo mediante el software de diseño de dibujo asistido por computador AutoCAD 2019 (Figura 15)

Figura 15. Área de la sección del emisor situada dentro de la tubería.



Con la Ecuación 15 se determinó la pérdida por conexión de longitud equivalente ocasionada por el emisor en la tubería (Fe). Así mismo, teniendo en cuenta el espaciamiento entre emisores (0.6 m) y el número de goteros en el lateral (83) con caudal promedio de 3.79 l/h : se obtuvo que el caudal del lateral fue de $0,00008715\text{ m}^3/\text{s}$.

La Información y resultados generales del lateral con las tres pendientes topográficas del estudio, se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Datos del lateral de riego por goteo.

Longitud	50	m	
Diametro	0.013	m	
Área de la sección circular de la tubería lateral	0.0134	cm^2	
Caudal	0.00008715	m^3/s	
Espaciamiento entre emisores	0.6	M	
Cantidad de emisores	83	Unidades	
Pérdida de carga unitaria	0.00544	kg/cm^2	Ecuación 13
Longitud equivalente	0.018	kg/cm^2	Ecuación 15
Pérdida de carga unitaria corregida por las pérdidas Localizadas	0.00560	kg/cm^2	Ecuación 14
Factor de Christiansen	0.370	Adimensional	Ecuación 16
Pérdidas por fricción	0.1290	kg/cm^2	Ecuación 17
Presión a la entrada del lateral con pendiente 0%	2.096	kg/cm^2	Ecuación 18
Presión a la entrada del lateral con pendiente -2%	2.046	kg/cm^2	Ecuación 18
Presión a la entrada del lateral con pendiente +2%	2.146	kg/cm^2	Ecuación 18

3.3. Datos de la prueba del lateral de riego por goteo en condiciones normales de trabajo (Sin fugas).

En la Tabla 4 se observa el caudal promedio de los emisores en las tres posiciones topográficas a las que se sometió el lateral de riego cuyo valor corresponde a $3,847\text{ l/h}$, lo que significa que existe un porcentaje de diferencia del 1,6% entre el caudal del diseño del emisor y el caudal promedio obtenido en las pruebas de campo. De igual manera, teniendo en cuenta, la desviación estándar se evidencia una reducida dispersión de los caudales, indicando así un ligero margen de separación entre los caudales de los goteros con respecto al caudal promedio. El incremento del caudal promedio de los emisores en el lateral con posición ascendente fue debido a que en dicha posición el sistema requirió mayor carga de presión. Finalmente, el coeficiente de variación CV , se obtuvo que el gotero Xeri-bug 10 PC se clasificó en la categoría de emisores de elevada uniformidad según lo expresado por Pizarro (1996), así mismo, según Keller y Bliesner los emisores evaluados se clasifican como “excelente” basado en el CV .

Tabla 4. Características hidráulicas del lateral de riego sin fugas.

Variables (Datos de campo)	PENDIENTE			Unidades
	0%	-2%	+2%	
Caudal promedio emisor	3.844	3.835	3.863	l/h

Variables (Datos de campo)	PENDIENTE			Unidades
	0%	-2%	+2%	
Varianza	0.032	0.035	0.035	$(l/h)^2$
Desviación Estándar	0.179	0.189	0.187	l/h
Coefficiente de variación	0.047	0.049	0.048	-
Caudal mínimo	3.585	3.555	3.585	l/h
Cuartil menor	3.623	3.609	3.645	l/h
Caudal de diseño emisor	3.785	3.785	3.785	l/h
Caudal del Lateral	5.318	5.306	5.344	l/min

3.3.1. Evaluación de pérdidas de carga total en el lateral de riego por goteo sin fugas

Teniendo en cuenta las metodologías empleadas en el presente trabajo, en la tabla 5 se presenta el contraste entre la presión real y calculada, en la cual se observa que la metodología para estimar las pérdidas de carga tramo a tramo es adecuada, ya que el error obtenido fue inferior al 2% en las tres pendientes evaluadas.

Tabla 5. Pérdidas de carga a lo largo del lateral sin fugas en tres pendientes.

Pendiente tubería lateral	H_1 (kg/cm ²)	Longitud Acumulada (m)	% L	H_{ft} (kg/cm ²)	H_{fT} (kg/cm ²)	H_T (kg/cm ²)	% Diferencia
0%	2.096	0	0	-	-	-	-
	2.076	10	20	0.0581	0.0581	2.038	1.90%
	2.031	20	40	0.0396	0.0977	2.037	0.30%
	2.001	30	60	0.0217	0.1194	2.009	0.41%
	1.992	40	80	0.0087	0.1281	1.992	0.00%
	1.983	50	100	0.0014	0.1295	1.991	0.37%
-2%	2.039	0	0	-	-	-	-
	2.004	10	20	0.0253	0.0253	2.014	0.49%
	1.990	20	40	0.0115	0.0368	1.993	0.13%
	1.969	30	60	-0.0025	0.0343	1.993	1.18%
	1.990	40	80	-0.0129	0.0214	1.982	0.41%
	2.004	50	100	-0.0188	0.0026	2.009	0.24%
2%	2.145	0	0	-	-	-	-
	2.082	10	20	0.0784	0.0784	2.066	0.73%
	2.011	20	40	0.0596	0.1379	2.022	0.53%
	1.969	30	60	0.0415	0.1795	1.970	0.03%
	1.934	40	80	0.0286	0.2080	1.940	0.34%
	1.899	50	100	0.0214	0.2294	1.913	0.72%

H_1 : Presión Real, H_{ft} : Pérdidas de carga total, H_{fT} : Pérdidas de carga total acumulada. H_T : Presión Teórica ($H_1 - H_{ft}$)



3.3.2. Resultados de la prueba del lateral con fuga en el 20% de la longitud de la tubería

En el caso de la presencia de una fuga al 20% de la longitud de la tubería lateral, se logró identificar un aumento del coeficiente de variación del 55% en comparación con los resultados de la Tabla 4 para pendiente cero.

Principalmente, se detalló un elevado grado de dispersión del caudal de los goteros cuando el lateral se encontraba con pendiente topográfica de 2% ascendente (ver Tabla 6) En ese sentido, dicha variación ocasionó un aumento relevante en la desviación estándar, lo que, a su vez, generó que el coeficiente de variación incrementara. Por otra parte, el caudal mínimo se redujo especialmente en las posiciones ascendente y descendente del lateral, debido a que en aquellas posiciones se presentó un mayor caudal de fuga, lo que generó mayores pérdidas de carga local y en consecuencia el funcionamiento de los emisores decreció.

Tabla 6. Características hidráulicas del lateral con una fuga al 20% de la longitud.

Variables (Datos de campo)	PENDIENTE			Unidades
	0%	-2%	+2%	
Caudal promedio del emisor	3.615	3.385	3.392	l/h
Varianza	0.068	0.539	0.251	$(l/h)^2$
Desviación Estándar	0.262	0.739	0.504	l/h
Coeficiente de variación	0.073	0.218	0.149	-
Caudal mínimo	2.895	1.425	1.545	l/h
Cuartil menor	3.294	2.517	2.709	l/h
Caudal de diseño del emisor	3.785	3.785	3.785	l/h
Caudal de la fuga	231.13	239.18	281,53	l/h
Caudal del Lateral	4.941	4.626	4,635	l/min
Coeficiente de pérdidas (K_c)	0.544	0.586	0,432	-

3.3.3. Evaluación de pérdidas de carga total en el lateral de riego por goteo con fuga en el 20% de la longitud

En la Tabla 7 se presentan los resultados de la presión real antes y después de la fuga (H_1 y H_2), las pérdidas de carga a lo largo del lateral, así como, la magnitud de la despresurización causada por la fuga situada a los 10 m; registrando una variación de presión en la entrada del lateral del 13% en pendiente uniforme y del 15% en pendiente ascendente y descendente de 2%. En el lateral con pendiente uniforme el resultado de las pérdidas de la cabeza de presión se produjo mayoritariamente en el primer 20% de la tubería, las cuales fueron causadas por el incremento del caudal en dicha sección, sin embargo, en el restante de la tubería las pérdidas de carga total estimadas disminuyeron considerablemente como consecuencia del continuo descenso del caudal. Finalmente, el comportamiento de las pérdidas de carga a lo largo del lateral fue bien descrito con el procedimiento tramo a tramo con errores máximos del 3.33% en todas las pendientes.

Tabla 7. Pérdidas de carga a lo largo del lateral con una fuga en el 20% de la longitud en tres pendientes.

Pendiente del lateral	H_1 (kg/cm ²)	H_2 (kg/cm ²)	L_{acum} (m)	% L	$H_f + H_m$ (kg/cm ²)	H_{acum} (kg/cm ²)	H_T (kg/cm ²)	% Diferencia
0%	2.095	1.821	0	0	-	-	1.821	0.00%
	2.076	1.665	10	20	0.1566	0.1566	1.665	0.00%
	2.030	1.617	20	40	0.0356	0.1922	1.629	0.72%
	2.000	1.582	30	60	0.0194	0.2116	1.598	0.99%
	1.991	1.568	40	80	0.0077	0.2193	1.575	0.41%
	1.983	1.554	50	100	0.0012	0.2205	1.567	0.82%
-2%	2.039	1.723	0	0	-	-	1.723	0.00%
	2.004	1.594	10	20	0.1294	0.1294	1.594	0.00%
	1.990	1.624	20	40	0.0110	0.1404	1.583	2.65%
	1.969	1.603	30	60	-0.0031	0.1373	1.628	1.49%
	1.990	1.639	40	80	-0.0133	0.124	1.617	1.35%
	2.004	1.646	50	100	-0.0189	0.1051	1.657	0.72%
2%	2.144	1.821	0	0	-	-	1.821	0.00%
	2.081	1.622	10	20	0.1995	0.1995	1.622	0.00%
	2.011	1.610	20	40	0.0535	0.2531	1.568	2.68%
	1.969	1.519	30	60	0.0392	0.2922	1.571	3.33%
	1.933	1.512	40	80	0.0271	0.3193	1.492	1.34%
	1.898	1.491	50	100	0.0212	0.3404	1.491	0.00%

H_1 : Presión antes de la fuga. H_2 : Presión después de la Fuga. L_{acum} : Longitud Acumulada. L : Longitud H_f : Pérdidas por fricción. H_m : Pérdidas menores. H_{acum} : Pérdidas de carga total acumulada. H_T : Presión Teórica ($H_2 - (H_f + H_m)$).

Nota. El valor sombreado en H_2 corresponde a la carga de presión estimada en el sitio de la fuga, y el valor sombreado en H_T corresponde a la cabeza de presión determinada en la entrada de la tubería lateral.

3.3.4. Resultados de la prueba del lateral con fuga en el 40% de la longitud de la tubería

La presencia de una fuga a los 20 m de la tubería lateral, (40%L), aumentó la desviación estándar de caudales en comparación a la fuga a los 10 m. debido a que la presencia de la fuga al 40% en la tubería generó mayores pérdidas de carga total (Tabla 8)

Tabla 8. Características hidráulicas del lateral con una fuga al 40% de la longitud.

Variables (Datos de campo)	PENDIENTE			Unidades
	0%	-2%	+2%	
Caudal promedio del emisor	3617	3.545	3.498	l/h
Varianza	0.131	0.220	0.236	(l/h) ²

Variables (Datos de campo)	PENDIENTE			Unidades
	0%	-2%	+2%	
Desviación Estándar	0.362	0.469	0.486	l/h
Coefficiente de variación	0.100	0.132	0.139	-
Caudal mínimo	2.228	1.815	1.605	l/h
Cuartil menor	3.207	2.916	2.856	l/h
Caudal de diseño del emisor	3.785	3.785	3.785	l/h
Caudal de la fuga	164.34	206.65	243.36	l/h
Caudal del Lateral	4.943	4.845	4.780	l/min
Coefficiente de pérdidas (Kc)	0.827	0.593	0.566	-

3.3.5. Evaluación de pérdidas de carga total en el lateral de riego por goteo con fuga en el 40% de la longitud

Los resultados de la distribución antes y después de la cabeza de presión a lo largo del lateral de la fuga ubicada a los 20 m se dan en la Tabla 9. Los datos muestran que una fuga situada al 40% de la entrada de la tubería lateral, generó un impacto significativamente menor en la variación en el extremo inicial de la cabeza de presión, en contraste con la fuga anterior. Sin embargo, la fluctuación de la carga de altura a lo largo de la tubería se incrementó en las tres condiciones de pendiente. Se observó que el efecto de la despresurización de la tubería en la entrada del lateral fue del 10% en condiciones de pendiente uniforme, 12% en condición de pendiente cuesta abajo y, 14,7 en el lateral con pendiente ascendente.

A pesar de la reducción del efecto de la fuga al 40% de la longitud, se logró un incremento en la variación de la presión registrada en el manómetro en el punto inicial de la tubería y la cabeza de presión obtenida en el último punto aguas abajo del lateral del 18% en la tubería con pendiente nivelada, 8% con pendiente descendente y, 23% con el gradiente de inclinación ascendente.

Como se muestra en la Tabla 9, en contraste con la simulación de la fuga anterior, las pérdidas de carga total disminuyeron en el primer 20% de la tubería en las tres condiciones de pendiente. No obstante, las pérdidas acumuladas hasta el sitio de la fuga incrementaron 12% en el lateral a nivel, 34% en la lateral cuesta abajo y, 23% en la lateral cuesta arriba. En consecuencia, las pérdidas de carga total generadas a lo largo de la tubería aumentaron significativamente respecto de la fuga anterior.

Tabla 9. Pérdidas de carga a lo largo del lateral con una fuga en el 40% de la longitud en tres pendientes.

Pendiente del lateral	H ₁ (kg/cm ²)	H ₂ (kg/cm ²)	L acum (m)	% L	H _f + H _m (kg/cm ²)	H _{acum} (kg/cm ²)	H _T (kg/cm ²)	% Diferencia
0%	2.095	1.885	0	0	-	-	1.885	0.00%
	2.076	1.716	10	20	0.1198	0.1198	1.765	2.78%
	2.030	1.618	20	40	0.0977	0.2175	1.618	0.00%
	2.000	1.575	30	60	0.0193	0.2368	1.599	1.48%



Pendiente del lateral	H_1 (kg/cm ²)	H_2 (kg/cm ²)	L acum (m)	% L	$H_f + H_m$ (kg/cm ²)	H_{acum} (kg/cm ²)	H_T (kg/cm ²)	% Diferencia
	1.991	1.561	40	80	0.0077	0.2445	1.568	0.41%
	1.983	1.554	50	100	0.0013	0.2458	1.560	0.37%
-2%	2.039	1.800	0	0	-	-	1.800	0.00%
	2.004	1.716	10	20	0.1182	0.1182	1.682	2.01%
	1.990	1.621	20	40	0.0949	0.2131	1.621	0.00%
	1.969	1.596	30	60	-0.0020	0.2111	1.623	1.64%
	1.990	1.617	40	80	-0.0130	0.1981	1.609	0.50%
	2.004	1.660	50	100	-0.0188	0.1793	1.636	1.43%
2%	2.144	1.828	0	0	-	-	1.828	0.00%
	2.081	1.667	10	20	0.1766	0.1766	1.652	0.90%
	2.011	1.514	20	40	0.1526	0.3292	1.514	0.00%
	1.969	1.463	30	60	0.0378	0.3670	1.476	0.91%
	1.933	1.442	40	80	0.0271	0.3942	1.436	0.42%
	1.898	1.406	50	100	0.0212	0.4154	1.420	0.98%

H_1 : Presión antes de la fuga. H_2 : Presión después de la Fuga. L_{acum} : Longitud Acumulada. L : Longitud H_f : Pérdidas por fricción. H_m : Pérdidas menores. H_{acum} : Pérdidas de carga total acumulada. H_T : Presión Teórica ($H_2 - (H_f + H_m)$).

3.3.6. Resultados de la prueba del lateral con fuga en el 60% de la longitud de la tubería

La presencia de una fuga al 60% de la tubería lateral ocasionó un mayor grado de perjuicios con relación en la dispersión de los caudales, especialmente en la posición descendente de la tubería. Igualmente, se presentó un descenso del 10,03% en el caudal medio de los emisores en las tres posiciones topográficas del estudio, ocasionando que los emisores no entregaran el caudal deseado. Además, se observa en la Tabla 10 que los emisores, proporcionaron un caudal por debajo de los 3 l/h, lo que a su vez provocó una alteración relevante en la uniformidad de riego.

Tabla 10. Características hidráulicas del lateral con una fuga al 60% de la longitud.

Variables (Datos de campo)	PENDIENTE			Unidades
	0%	-2%	+2%	
Caudal promedio del emisor	3.463	3.337	3.415	l/h
Varianza	0.312	0.350	0.254	(l/h) ²
Desviación Estándar	0.562	0.595	0.507	l/h
Coeficiente de variación	0.162	0.178	0.149	-
Caudal mínimo	1.110	1.200	1.140	l/h
Cuartil menor	2.697	2.509	2.589	l/h
Caudal de diseño del emisor	3.785	3.785	3.785	l/h
Caudal de la fuga	154.4	237.43	259.9	l/h
Caudal del Lateral	4.733	4.561	4.667	l/min

Variables (Datos de campo)	PENDIENTE			Unidades
	0%	-2%	+2%	
Coeficiente de pérdidas (Kc)	0.968	0.529	0.419	-

3.3.7. Evaluación de pérdidas de carga total en el lateral de riego por goteo con fuga en el 60% de la longitud

Los resultados de la cabeza de presión medida y estimada, antes y después de la fuga al 60% en el lateral se muestran en la Tabla 11. La simulación de la fuga a los 30 m del lateral produjo un descenso en la cabeza de presión registrada en la entrada del lateral del 10% en la condición a nivel, 14% en el lateral con gradiente de inclinación negativo y, 12% en el lateral con pendiente positiva. Así mismo, se observó que, con la existencia de una fuga, la variación entre la carga de altura obtenida por el manómetro en la entrada del lateral y la carga de presión registrada en el extremo de la tubería aguas abajo en las condiciones de pendiente topográfica nivelada, descendente y ascendente del 2% fue del 16%, 18% y 27% respectivamente.

Las pérdidas de carga total aumentaron simultáneamente con el incremento del caudal dentro de la tubería. Se evidenció, que en el primer 20% de la tubería se generó la mayor cantidad de pérdidas, conservando el mismo comportamiento de las pérdidas generadas en las fugas simuladas anteriormente. Es decir, se produjo un 97% de las pérdidas totales en el lateral con posición uniforme en la sección de los 30 m del lateral donde trasegó el valor más elevado de caudal, hasta el sitio de la fuga. Así mismo, en el lateral con pendiente cuesta abajo se presentó un 89% de las pérdidas y 91% en el lateral con inclinación cuesta arriba (Ver Tabla 11). En consecuencia, el descenso de la cabeza de presión fue apreciablemente mayor en contraste con las fugas anteriores.

Tabla 11. Pérdidas de carga a lo largo del lateral con una fuga en el 60% de la longitud en tres pendientes.

Pendiente del lateral	H_1 (kg/cm ²)	H_2 (kg/cm ²)	L_{acum} (m)	% L	$H_f + H_m$ (kg/cm ²)	H_{acum} (kg/cm ²)	H_T (kg/cm ²)	% Diferencia
0%	2.095	1.878	0	0	-	-	1.878	0.00%
	2.076	1.779	10	20	0.1087	0.1087	1.769	0.58%
	2.030	1.674	20	40	0.0890	0.1977	1.690	0.98%
	2.000	1.610	30	60	0.0636	0.2613	1.610	0.00%
	1.991	1.589	40	80	0.0070	0.2683	1.603	0.86%
	1.983	1.582	50	100	0.0012	0.2695	1.588	0.37%
-2%	2.039	1.758	0	0	-	-	1.758	0.00%
	2.004	1.653	10	20	0.1266	0.1266	1.632	1.29%
	1.990	1.519	20	40	0.1052	0.2318	1.547	1.83%
	1.969	1.442	30	60	0.0766	0.3084	1.442	0.00%
	1.990	1.463	40	80	-0.0138	0.2947	1.456	0.45%

Pendiente del lateral	H_1 (kg/cm ²)	H_2 (kg/cm ²)	L_{acum} (m)	% L	$H_f + H_m$ (kg/cm ²)	H_{acum} (kg/cm ²)	H_T (kg/cm ²)	% Diferencia
	2.004	1.449	50	100	-0.0190	0.2756	1.482	2.23%
	2.144	1.878	0	0	-	-	1.878	0.00%
	2.081	1.744	10	20	0.1831	0.1831	1.695	2.92%
2%	2.011	1.554	20	40	0.1604	0.3435	1.584	1.86%
	1.969	1.424	30	60	0.1298	0.4733	1.424	0.00%
	1.933	1.399	40	80	0.0268	0.5000	1.398	0.13%
	1.898	1.364	50	100	0.0211	0.5211	1.378	1.02%

H_1 : Presión antes de la fuga. H_2 : Presión después de la Fuga. L_{acum} : Longitud Acumulada. L : Longitud H_f : Pérdidas por fricción. H_m : Pérdidas menores. H_{acum} : Pérdidas de carga total acumulada. H_T : Presión Teórica ($H_2 - (H_f + H_m)$).

3.3.8. Resultados de la prueba del lateral con fuga en el 80% de la longitud de la tubería

En la Tabla 12, se evidencian los diferentes resultados de las variables de campo analizadas. Inicialmente, el caudal promedio de los emisores disminuyó aproximadamente 20,29% en las tres posiciones topográficas del estudio. Así mismo, se observa una dispersión mayor de los caudales en contraste con las fugas simuladas en los porcentajes de longitud de tubería mencionados en los numerales anteriores. Principalmente, cuando el lateral estaba en posición ascendente, el nivel de variación del flujo de los goteros evidenció mayor cantidad de emisores resultando de ello un caudal inferior al caudal promedio a lo demostrado en condiciones normales, por lo que se establece que una fuga ocasionada al 80% de la tubería contrajo severas consecuencias en la uniformidad de aplicación de agua.

Tabla 22. Características hidráulicas del lateral con una fuga al 80% de la longitud.

Variables (Datos de campo)	PENDIENTE			Unidades
	0%	-2%	+2%	
Caudal promedio del emisor	3.382	3.283	2.927	l/h
Varianza	0.199	0.267	0.480	(l/h) ²
Desviación Estándar	0.448	0.520	0.697	l/h
Coeficiente de variación	0.133	0.158	0.238	-
Caudal mínimo	1.680	1.650	1.545	l/h
Cuartil menor	2.793	2.595	2.046	l/h
Caudal de diseño del emisor	3.785	3.785	3.785	l/h
Caudal de la fuga	287.62	325.14	350.37	l/h
Caudal del Lateral	4.622	4.487	4.000	l/min
Coeficiente de pérdidas (K_c)	0.423	0.409	0.352	-

3.3.9. Evaluación de pérdidas de carga total en el lateral de riego por goteo con fuga en el 80% de la longitud

Los resultados de la distribución de la cabeza de presión, medida antes y después de la fuga situada al 80% de la longitud del lateral se muestran en la Tabla 13. El efecto de la despresurización de la tubería se reflejó principalmente con la caída de la carga de altura en la entrada del lateral. Así mismo, el descenso de la presión al inicio de la tubería fue del 16% en comparación con el lateral en pendiente uniforme, un 20% en el lateral con gradiente de inclinación negativo y, 19% en el lateral con pendiente cuesta arriba. En ese mismo sentido, la variación de la cabeza presión entre el punto inicial aguas arribas y el punto final aguas abajo en la lateral en condiciones de fuga fue del 31% con pendiente uniforme y, en la posición descendente y ascendente fue de 35% y 46% respectivamente.

Las pérdidas totales de energía en el lateral con fuga incrementaron 76% en contraste con el lateral de riego sin fugas en pendiente cero. Por otra parte, en el lateral con pendiente ascendente y descendente del 2%, dichas pérdidas incrementaron en 99% y 69% respectivamente.

Tabla 13. Pérdidas de carga a lo largo del lateral con una fuga en el 80% de la longitud en tres pendientes.

Pendiente del lateral	H_1 (kg/cm ²)	H_2 (kg/cm ²)	L_{acum} (m)	% L	$H_f + H_m$ (kg/cm ²)	H_{acum} (kg/cm ²)	H_T (kg/cm ²)	% Diferencia
0%	2.095	1.765	0	0	-	-	1.765	0.00%
	2.076	1.624	10	20	0.1766	0.1766	1.588	2.27%
	2.030	1.442	20	40	0.1525	0.3291	1.472	2.06%
	2.000	1.308	30	60	0.1208	0.4499	1.321	0.97%
	1.991	1.215	40	80	0.0931	0.5430	1.215	0.00%
	1.983	1.217	50	100	0.0010	0.5440	1.214	0.22%
-2%	2.039	1.632	0	0	-	-	1.632	0.00%
	2.004	1.477	10	20	0.1749	0.1749	1.457	1.39%
	1.990	1.287	20	40	0.1512	0.3262	1.326	2.91%
	1.969	1.146	30	60	0.1185	0.4447	1.168	1.89%
	1.990	1.057	40	80	0.0892	0.5339	1.057	0.00%
	2.004	1.062	50	100	-0.0190	0.5148	1.076	1.33%
2%	2.144	1.737	0	0	-	-	1.737	0.00%
	2.081	1.526	10	20	0.2144	0.2144	1.523	0.23%
	2.011	1.294	20	40	0.1959	0.4104	1.330	2.72%
	1.969	1.104	30	60	0.1664	0.5768	1.128	2.08%
	1.933	0.965	40	80	0.1391	0.7158	0.965	0.00%
	1.898	0.935	50	100	0.0209	0.7367	0.944	0.94%

H_1 : Presión antes de la fuga. H_2 : Presión después de la Fuga. L_{acum} : Longitud Acumulada. L : Longitud H_f : Pérdidas por fricción. H_m : Pérdidas menores. H_{acum} : Pérdidas de carga total acumulada. H_T : Presión Teórica ($H_2 - (H_f + H_m)$).



3.3.10. Resultados de la prueba del lateral con fuga en el 100% de la longitud de la tubería

En la longitud de la tubería lateral se evidenciaron importantes cambios tanto en la uniformidad de riego, como en la variación de presión cuando la fuga se encontraba al final de la tubería es decir al 100% de la longitud (Ver tabla 14); Asimismo, cabe mencionar que se presentó una similitud entre los cambios presentados con fuga al 80% y 100% de la longitud. No obstante, se observó que la presencia de una fuga al final de la longitud de un lateral de riego por goteo hizo que la uniformidad de riego se afecte de manera significativa. De igual modo, se logra corroborar la variación en el flujo entregado por los emisores en las tres posiciones topográficas del estudio.

Tabla 14. Características hidráulicas del lateral con una fuga al 100% de la longitud.

Variables (Datos de campo)	PENDIENTE			Unidades
	0%	-2%	+2%	
Caudal promedio del emisor	3.177	3.305	3.168	l/h
Varianza	0.340	0.268	0.446	(l/h) ²
Desviación Estándar	0.586	0.521	0.672	l/h
Coeficiente de variación	0.185	0.158	0.212	-
Caudal mínimo	0.960	1.575	0.345	l/h
Cuartil menor	2.363	2.606	2.246	l/h
Caudal de diseño del emisor	3.785	3.785	3.785	l/h
Caudal de la fuga	258.97	294.25	278.49	l/h
Caudal del Lateral	4.341	4.516	4.330	l/min
Coeficiente de pérdidas (Kc)	0.637	0.430	0.355	-

3.3.11. Evaluación de pérdidas de carga total en el lateral de riego por goteo con fuga en el 100% de la longitud

En la Tabla 15 se evidencia el comportamiento de la carga de altura antes y después de la fuga situada en el extremo del lateral con las tres condiciones de pendiente. Se presentó un descenso del 20% en la carga de presión de la entrada del lateral con pendiente uniforme, en consecuencia, este descenso fue la mayor variación de presión en dicha condición de pendiente. De igual manera, se evidencia que, en la caída de la carga de presión, en la entrada del lateral con pendiente descendente y ascendente fue del 17% y 12%.

Tabla 15. Pérdidas de carga a lo largo del lateral con una fuga en el 100% de la longitud en tres pendientes.

Pendiente del lateral	H ₁ (kg/cm ²)	H ₂ (kg/cm ²)	L acum (m)	% L	H _f + H _m (kg/cm ²)	H _{acum} (kg/cm ²)	H _T (kg/cm ²)	% Diferencia
0%	2.095	1.688	0	0	-	-	1.688	0.00%
	2.076	1.575	10	20	0.1538	0.1538	1.534	2.69%
	2.030	1.406	20	40	0.1329	0.2866	1.442	2.49%

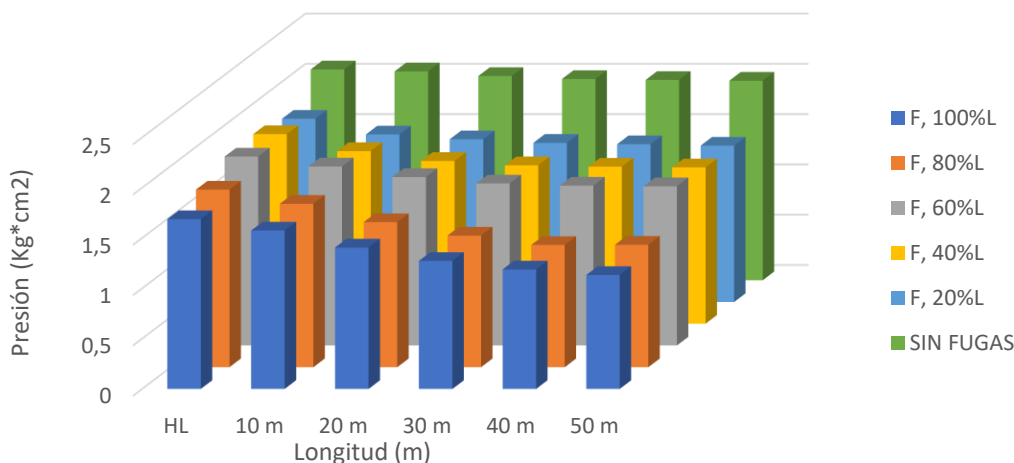
Pendiente del lateral	H_1 (kg/cm ²)	H_2 (kg/cm ²)	L acum (m)	% L	$H_f + H_m$ (kg/cm ²)	H_{acum} (kg/cm ²)	H_T (kg/cm ²)	% Diferencia
	2.000	1.273	30	60	0.1052	0.3918	1.301	2.18%
	1.991	1.188	40	80	0.0797	0.4716	1.193	0.39%
	1.983	1.133	50	100	0.0559	0.5274	1.133	0.00%
-2%	2.039	1.688	0	0	-	-	1.688	0.00%
	2.004	1.554	10	20	0.1578	0.1578	1.530	1.58%
	1.990	1.385	20	40	0.1353	0.2931	1.419	2.36%
	1.969	1.266	30	60	0.1040	0.3971	1.281	1.21%
	1.990	1.203	40	80	0.0752	0.4723	1.191	1.00%
	2.004	1.155	50	100	0.0478	0.5201	1.155	0.00%
2%	2.144	1.885	0	0	-	-	1.885	0.00%
	2.081	1.695	10	20	0.1823	0.1823	1.702	0.44%
	2.011	1.505	20	40	0.1605	0.3428	1.534	1.92%
	1.969	1.364	30	60	0.1326	0.4753	1.372	0.59%
	1.933	1.238	40	80	0.1075	0.5829	1.257	1.52%
	1.898	1.155	50	100	0.0824	0.6653	1.155	0.00%

H_1 : Presión antes de la fuga. H_2 : Presión después de la Fuga. L_{acum} : Longitud Acumulada. L : Longitud H_f : Pérdidas por fricción. H_m : Pérdidas menores. H_{acum} : Pérdidas de carga total acumulada. H_T : Presión Teórica ($H_2 - (H_f + H_m)$)).

La variación de la carga de presión a lo largo del lateral de riego en condiciones normales y con la presencia de una fuga parcial en las tres condiciones topográficas del estudio se presentan en las gráficas 1, 2 y 3.

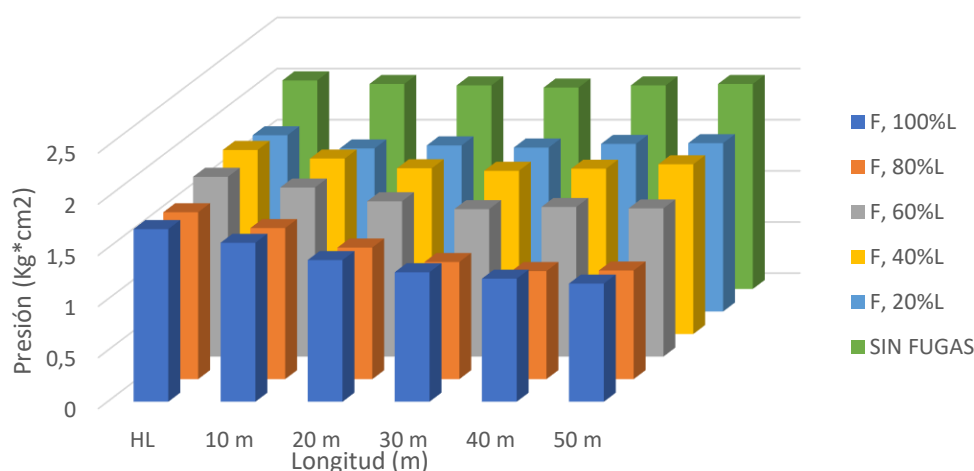
La gráfica 1 muestra el comportamiento de la carga de presión a lo largo de lateral de riego con pendiente uniforme. Se evidencia que la caída de la presión en la entrada del lateral fue del 14% en promedio, por otra parte, el descenso de la presión al final de la tubería con la presencia de las fugas simuladas en el estudio fue en promedio del 29%.

Gráfica 1. Presión a lo largo del lateral con pendiente topográfica 0%.



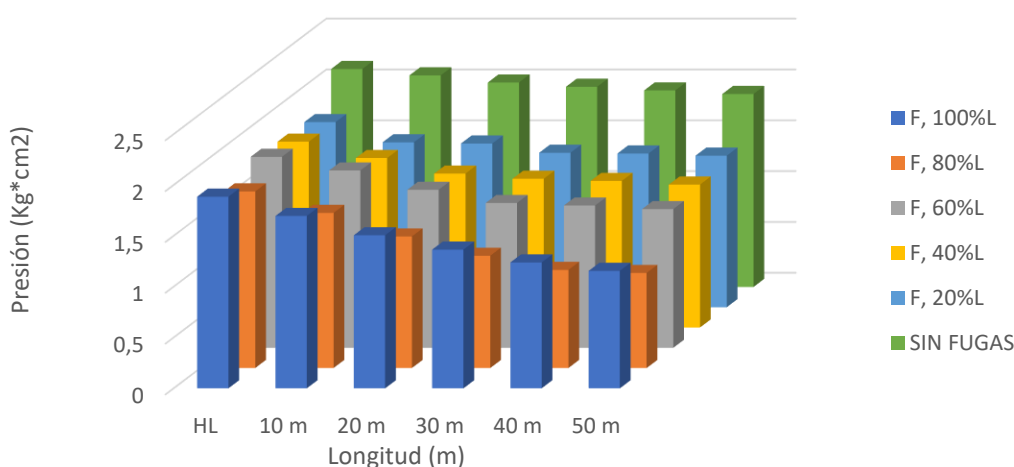
La grafica 2 evidencia la variación de la presión en el lateral de riego del estudio con posición topográfica de 2% cuesta abajo. Se muestra que la presión descendió 5% en el lateral de riego en condiciones normales. Sin embargo, la existencia de una fuga provocó en promedio 16% la caída de la carga de presión en la entrada del lateral y dicha caída aumentó hasta 30% a los 50 m de longitud de tubería.

Gráfica 2. Presión a lo largo del lateral con pendiente topográfica 2% descendente.



La grafica 3 muestra el comportamiento de la presión en el lateral de riego del estudio con posición topográfica de 2% ascendente. Se muestra que la presión descendió 8% en el lateral de riego en condiciones normales. No obstante, el surgimiento de una fuga provocó en promedio 15% la caída de la carga de presión en la entrada de la tubería y dicha caída de la presión incrementó hasta 33% a los 50 m de longitud.

Gráfica 3. Presión a lo largo del lateral con pendiente topográfica 2% ascendente.



En la Tabla 17 se presenta el coeficiente de determinación, el cual describe el grado de correlación lineal entre la presión real y teórica, evidenciando que la metodología de estimar las perdidas tramo a tramo es adecuada para este tipo de estudios.

Tabla 17. Coeficiente de determinación para el modelo de estimación de la presión en los puntos del estudio a partir de las pérdidas de carga total.

Estado de la tubería lateral	Pendiente del Lateral 0%	Pendiente del Lateral -2%	Pendiente del Lateral 2%
	R^2	R^2	R^2
Condición normal	0.992	0.791	0.860
Fuga al 20%	0.936	0.783	0.998
Fuga al 40%	0.996	0.926	0.979
Fuga al 60%	0.985	0.976	0.995
Fuga al 80%	0.998	0.993	0.991
Fuga al 100%	0.998	0.991	0.986

R^2 : Coeficiente de determinación

3.4.Efecto de las fugas en el coeficiente de uniformidad de emisión en laterales de riego por goteo

Los sistemas de riego por goteo se diseñan con el objetivo de entregar de la manera más efectiva el recurso hídrico a las plantas, convirtiéndolo, en el sistema de riego presurizado con la mayor uniformidad de emisión. En ese sentido, se recomiendan altos valores de coeficiente de uniformidad de emisión, el cual está en función del espaciamiento entre los emisores, la presión de operación del sistema, la pendiente topográfica del terreno y la longitud de la tubería. Por lo tanto, en la Tabla 16 se presentan los resultados de los coeficientes de uniformidad de emisión empleando las ecuaciones 23, 24 y 25 en condiciones normales y con fugas en las tres pendientes utilizadas en el presente trabajo.

Tabla 16. Coeficiente de uniformidad en el lateral de riego

Estado de la Tubería Lateral	EU en el Lateral con Pendiente 0%		
	Keller y Karmeli (1974)	Keller y Karmeli (1975)	Barragán (2005)
Condición normal	96	89	92
Fuga al 20%L	87	69	75
Fuga al 40%L	85	51	57
Fuga al 60%L	71	23	26
Fuga al 80%L	74	37	42
Fuga al 100%L	62	19	22
Estado de la Tubería Lateral	EU en el Lateral con Pendiente Descendente 2%		
	Keller y Karmeli (1974)	Keller y Karmeli (1975)	Barragán (2005)
Condición normal	95	88	91
Fuga al 20%L	66	27	32
Fuga al 40%L	77	40	45
Fuga al 60%L	66	25	28
Fuga al 80%L	69	35	40
Fuga al 100%L	69	33	38
Estado de la Tubería Lateral	EU en el Lateral con Pendiente Ascendente 2%		
	Keller y Karmeli (1974)	Keller y Karmeli (1975)	Barragán (2005)
Condición normal	96	89	92
Fuga al 20%L	72	38	33



EU en el Lateral con Pendiente 0%

Estado de la Tubería Lateral	Keller y Karmeli (1974)	Keller y Karmeli (1975)	Barragán (2005)
Fuga al 40%L	75	35	40
Fuga al 60%L	68	24	28
Fuga al 80%L	54	28	34
Fuga al 100%L	59	7	5

L: Longitud

El *EU* estimado a partir de las pruebas de campo en el lateral sin fugas en las tres condiciones de pendiente fue en promedio del 92%, lo que indicó una “excelente uniformidad de distribución” del agua según lo expresado por Keller y Bliesner (1990). Sin embargo, se obtuvo que, la uniformidad de riego en el lateral con la fuga situada a los 10 m de la longitud de la tubería con gradiente nivelado disminuyó 17%. Así mismo, en el lateral con pendiente topográfica ascendente y descendente del 2% se presentó un descenso del *EU* del 49% y 55% respectivamente.

El comportamiento del *EU* en el lateral del estudio con la fuga a los 20 m de longitud presentó una disminución del 31% en el lateral uniformemente nivelado. No obstante, el *EU* en la tubería con la condición de pendiente aguas abajo decreció 41% y en la condición de pendiente aguas arriba se redujo 46%.

El *EU* del lateral con la fuga situada a 30 m de longitud de la tubería decreció 57% en el lateral con las tres condiciones de pendiente topográfica del estudio.

Por otra parte, el resultado de la uniformidad de emisión del lateral con la fuga localizada a 40 m de longitud de la tubería incrementó 45% en el lateral uniformemente nivelado y 48% en el lateral con inclinación aguas abajo, mientras que, en el lateral con pendiente ascendente el *EU* descendió 58%.

Finalmente, la uniformidad del riego estimada en el lateral del estudio con la fuga ubicada en el extremo aguas abajo evidenció una variación del 63% en el lateral con pendiente a nivel y 75% en el lateral con inclinación aguas arriba 2%, mientras que, la uniformidad del sistema descendió 49% en la lateral con pendiente cuesta abajo 2%.

La disminución de la uniformidad de emisión en el lateral con gradiente uniforme y ascendente 2% con una fuga a 50 m de la longitud de la tubería, se debe a que el 75% de los emisores entregaron un caudal inferior al caudal de diseño (3,79 l/h), además, en el lateral con pendiente aguas arriba algunos emisores del sistema no funcionaron, lo cual generó el descenso en la uniformidad de emisión. De igual manera, el efecto negativo más significativo en el lateral con pendiente descendente 2% y la fuga localizada a 30 m de la longitud se debió a la dispersión heterogénea del caudal de los emisores y a su valor más bajo, lo cual se reflejó en el coeficiente de variación y finalmente en la determinación del valor de *EU*.

Liu *et al.*, (2019) evaluaron el impacto de diferentes cargas de presión de operación sobre la obstrucción de los emisores en riego por goteo, estableciendo que el coeficiente de uniformidad de emisión decreció a medida que descendió la carga de presión de



UNIVERSIDAD

SURCOLOMBIANA

NIT: 891180084-2

ACREDITADA DE
ALTA CALIDAD

Resolución 11233 / 2018 - MEN

funcionamiento del sistema. Sin embargo, no aportaron soluciones numéricas para determinar el efecto de una fuga sobre el *EU* en el lateral del estudio. En el mismo sentido, la determinación de la distribución de la carga de presión a lo largo de la tubería y la uniformidad de riego en laterales con diferentes condiciones de pendiente topográfica, se alinea con el enfoque propuesto por Baiamonte (2018) pero no proporciona soluciones analíticas para establecer el efecto de una fuga en la uniformidad de emisión de riego.

VIGILADA MINEDUCACIÓN

📍 Sede Central / Av. Pastrana Borrero - Cra. 1

📍 Sede Administrativa / Cra. 5 No. 23 - 40

🌐 www.usco.edu.co / Neiva - Huila

☎ PBX: 875 4753

☎ PBX: 875 3686

☎ Línea Gratuita Nacional: 018000 968722





4. CONCLUSIONES.

La uniformidad de emisión de los laterales evaluados tuvo mayor variación con pendiente 0 y ascendente 2% cuando la fuga fue al final de la longitud de tubería, por otra parte, en el lateral con pendiente descendente 2%, la mayor variación de la uniformidad de emisión se presentó con presencia de fuga localizada a 30 m de longitud. Así mismo, se evidenció que el coeficiente de uniformidad de emisión *EU* de los laterales evaluados disminuía a medida que la fuga se alejaba de la entrada del lateral.

La despresurización que se presentó a lo largo de los laterales evaluados por la presencia de una fuga se debió a la transformación de esta en carga cinética y coeficiente de descarga, lo cual disminuyó la uniformidad de emisión de los laterales e incrementó la variación de la presión dentro de estos como se evidenció en los resultados de la presente investigación.



REFERENCIAS

- Bagarello, V., Ferro, V., Provenzano, G., & Pumo, D. (1997). Evaluating pressure losses in drip-irrigation lines. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 123(1), 1-7.
- Baiamonte, G. (2018). Advances in designing drip irrigation laterals. *Agricultural Water Management*. 199. 157-174. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.12.015>
- Barragan, J., y Wu, I.P. (2005). Simple Pressure Parameters for Micro-irrigation Design. *Biosystems Engineering*. 90 (4), 463-475. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2004.11.009>
- Keller, J., & Bliesner, R. D. (1990). *Sprinkle and trickle irrigation*. New York. Springer Science + Bussines Media.
- Keller, J., & Karmeli, D. (1974). Trickle Irrigation Design Parameters. *Transactions of the ASAE, St. Joseph*, 17(4), 678- 684
- Liu, Z., Xiao, Y., Li, Y., Zhou, B., Feng, J., Han, S., y Muhammad, T. (2019). Influence of operating pressure on emitter anti-clogging performance of drip irrigation system with high-sediment water, *Agricultural Water Management*. 213. 174 – 184 <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.10.017>.
- Pizarro, F., (1996), *Riegos localizados de alta frecuencia*, Madrid, España, Mundi-Prensa Libros, s.a.
- Wang, J., Yang, T., Wei, T., Chen, R., y Yuan, S. 2020. Experimental determination of local head loss of non-coaxial emitters in thin-wall lay-flat polyethylene pipes, *Biosystems Engineering*. 190, 71-86. doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.11.021.
- Yurdem, H., Demir, V., y Mancuhan, A. (2015). Development of a simplified model for predicting the optimum lengths of drip irrigation laterals with coextruded cylindrical in-line emitters. *Biosystems Engineering*. 137. 22-35. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.06.010>
- Zhang, L., y Merkley, P. (2012). Relationships between common irrigation application uniformity indicators. *Irrig Sci*. 30. 83-88. DOI 10.1007/s00271-011-0264-6